

# JARE-39, -40「しらせ」航路に沿った夏季南大洋 インド洋区における表層水中の動物 プランクトン現存量

工藤 栄<sup>1</sup>・伊倉千絵<sup>2</sup>・高橋晃周<sup>3</sup>・西川 淳<sup>4</sup>・  
石川 輝<sup>5</sup>・鷺山直樹<sup>6</sup>・平譯 亨<sup>1</sup>・小達恒夫<sup>1</sup>・  
渡辺研太郎<sup>1</sup>・福地光男<sup>1</sup>

Surface biomass of net-zooplankton in the Indian Ocean sector  
of the Southern Ocean during the icebreaker  
*Shirase* cruises of JARE-39, -40

Sakae Kudoh<sup>1</sup>, Chie Ikura<sup>2</sup>, Akinori Takahashi<sup>3</sup>, Jun Nishikawa<sup>4</sup>,  
Akira Ishikawa<sup>5</sup>, Naoki Washiyama<sup>6</sup>, Tohru Hirawake<sup>1</sup>, Tsuneo Odate<sup>1</sup>,  
Kentaro Watanabe<sup>1</sup> and Mitsuo Fukuchi<sup>1</sup>

**Abstract:** Wet weight of the net zooplankton biomass ( $>315\ \mu\text{m}$ , collecting NGG54 netting) in the surface water of the Indian Ocean sector of the Southern Ocean was analyzed using continuously pumped-up water from *ca.* 8 m depth during the two cruises of the 39th (4 Dec.–13 Dec. 1997 and 15 Feb.–19 Mar. 1998) and 40th (3 Dec.–20 Dec. 1998 and 24 Feb.–19 Mar. 1999) Japanese Antarctic Research Expeditions (JARE). The biomass varied widely; even samples collected from the same water body (difference of distance among the samples were several-100 miles away) sometimes had differences of 2–3 orders of magnitude. The biomass obtained around ocean frontal regions such as the Sub-tropical Front, Sub-Antarctic Front and Polar Front, an ocean ridge area (Kerguelen plateau) and off Prydz Bay tended to show higher biomass than other areas, often exceeding 500 mg/m<sup>3</sup>. The mean biomasses among the 4 water bodies separated by the ocean fronts, were 50, 68, 76 and 137 mg/m<sup>3</sup> in the Sub-tropical, Sub-Antarctic, Polar Frontal and Antarctic Zones, respectively. In the Antarctic Zone, the biomass tended to decrease from north toward south, and the west and eastward distribution showed high biomass over a relatively extensive area east of Prydz Bay and

<sup>1</sup>国立極地研究所, National Institute of Polar Research, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173-8515.

<sup>2</sup>東海大学海洋学部水産学科, Department of Fisheries, Faculty of Oceanography, Tokai University, Orido 3-20-1, Shimizu 424-8610.

<sup>3</sup>総合研究大学院大学極域科学専攻, Department of Polar Science, The Graduate University for Advanced Studies, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173-8515.

<sup>4</sup>東京大学海洋研究所, Ocean Research Institute, University of Tokyo, Minamidai, Nakano-ku, Tokyo 164-8639.

<sup>5</sup>三重大学生物資源学部, Faculty of Bioresources, Mie University, Kamihama-cho 1515, Tsu 514-8507.

<sup>6</sup>(株) 緑星社, Ryokuseisha Corp., Tsukiji Yasuda Bldg., 15-14, Tsukiji 2-chome, Chuo-ku, Tokyo 104-0045.

slightly high abundance offshore of Amundsen Bay. According to previous JAREs and other studies carried out in the Indian Ocean sector, areas which showed constantly higher zooplankton biomass seem to agree well with areas reported as showing higher phytoplankton production or biomass. In spite of the methodological difference, the present results obtained by continuous sampling during the two cruises were very similar to the previous results of K. Takahashi *et al.* (Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue, **52**, 209, 1998), which was summarized over 22 years data of NORPAC net sampling, and we were able to confirm the surface biomass and distribution of net zooplankton in the Indian Ocean Sector of the Southern Ocean during austral summer. The method applied in the present study is one good way for long-term monitoring of the surface zooplankton biomass along the JARE cruise track, because the sampling requires non-ship time and gives a good estimation of the biomass.

**要旨:** 第 39 次および第 40 次日本南極地域観測隊夏期行動期間中 (それぞれ 1997 年 12 月 4 日～12 月 13 日及び, 1998 年 2 月 15 日～3 月 19 日と 1998 年 12 月 3 日～12 月 20 日及び 1999 年 2 月 24 日～3 月 19 日), 南大洋インド洋区で南極観測船「しらせ」の航路に沿って表層海水をポンプ連続揚水し, プランクトンネットで 3～8 時間濾過して動物プランクトン試料を得た. 動物プランクトンの湿重量測定を行い, 航路に沿って現存量を整理した. 連続試料採取したにもかかわらず, 隣接した試料間においても現存量の変動は大きく, 動物プランクトンの不均一分布が伺えた. 動物プランクトン現存量は「しらせ」南下時に顕著に認められる海洋前線通過時にしばしばきわだって大きくなり, その前後の海域で得られた値との格差は際立っていた. これら海洋前線では水温・塩分変動が大きく, 南大洋インド洋海区を四つの海域 (亜熱帯海域, 亜南極海域, 極前線海域, 南極海域) に区切っている. 2 回の航海で得た現存量の平均値を比較したところ, 高緯度海域ほど平均値が大きくなる傾向があり, 南極海域で最大となった. 南極海域の内でもプリッツ湾沖から東方にかけての海域 (東経 70-110°) で現存量が大きく, これまでの停船観測結果で推察されていた同海域の生物生産性が高いことに呼応する現象と考えられた. また, リュツォ・ホルム湾沖からアムンゼン湾沖の大陸近く航行時に得られた現存量は, より沖合部を航行する東経 110-150° 間に得られた値よりも 1/2 程小さなものであり, さらに, 東経 110° 以東において大陸沿岸より航行した JARE-39 とやや沖合いを航行した JARE-40 で得られたデータ間でも前者の現存量が小さく, これらから南極海域では表層水中の動物プランクトン量が生物生産期間がより短くなると考えられる沿岸部ほど小さいことが推察された. 今回表層水中で連続試料採取して得られた動物プランクトン湿重量値は, 過去四半世紀間に停船観測において同海域で主にプランクトンネット採集によって得られた値と大きくは異なっていない. 動物プランクトン分布の正確な測定のためには動物プランクトンの鉛直分布特性など考慮する必要があるが, 海域ごとの空間分布特性や海域内での変動性などの研究には今回のようなポンプ揚水による試料採集でも適用可能な部分が多く, その研究実施方法の容易さを考慮すると今後の長期的な動物プランクトンモニタリングなどに適した手法と思われた.

## 1. はじめに

南大洋域における動物プランクトン研究は 20 世紀初頭のイギリスのディスカバリー号航海に始まり, 動物プランクトン群集組成や分布の解析から南極海域での「周極分布性」(Baker, 1954) や緯度にほぼ平行に存在する海洋前線で区切られる集団の存在 (例えば, 河村, 1971; Fukase, 1962; Brodskii, 1964, 1968) など, 今日までに貴重な成果が指摘されてきた. 日本南極

地域観測隊は 1972 年から南半球の夏季を中心とした南大洋インド洋区において、定常観測項目の一つとして動物プランクトン群集に焦点をあてて試料採集をごと年実施し、その分布に関するデータを報じてきている (例えば, Fukuchi and Tanimura, 1981; Watanabe *et al.*, 1984; Takahashi *et al.*, 1998). これらは航海ごとの停船観測点において各種プランクトンネット採集によって得られたものであり、それらの中でも NORPAC 標準ネットを用いた水深およそ 150 m 前後から表層までの鉛直採集法は、より長期間継続・実施されてきた手法である。近年, Takahashi *et al.* (1998) により、同手法によって採取された過去 22 年間のデータ解析が実施され、この中で彼らは南大洋インド洋区に存在する海洋前線で、緯度にほぼ平行に区分された四つの海域 (亜熱帯・亜南極・極前線・南極海域) で平均値としては最大で数倍に及ぶ現存量の差があること、それらの中で極前線海域で動物プランクトン量が最も高く、南極海域ではそれよりもわずかに少なくなる傾向があること、また、南極海域の一部では、現存量に 4-6 年周期の変動が生じている可能性を指摘している。しかしながら、動物プランクトン量は同一海域内の採集場所はもちろん採集実施年度によっても大幅に変動しており、得られた平均値間に有意差を見いだすまでには至っていない。

南極海において Hardy (1936a, b) は、水平距離 30 km を連続採集し、約 550 m ごとに区切って動物プランクトン分布を解析した結果、動物プランクトンの組成と量にきわめて大幅な差があることから、同一水俵内でも不均一分布性を示すことを報じている。このことは、ごく限られた観測点での動物プランクトンに関する情報のみでは、正確な分布とその量を推定することが困難で、これを克服するためには、なんらかの方法で試料採集頻度をあげる工夫が必要となることを意味する。

これらのことから、本研究では、これまでに各航海でノルパックネット採集などで点として捉え、推察されてきた動物プランクトン分布に関する知見を、航路に沿って線上に連続的に試料採集を行うことで、動物プランクトンの現存量のより詳細な情報を得ることを試みた。連続試料採集によって頻度を上げて不均一分布性を考慮しつつ, Takahashi *et al.* (1998) が指摘したような南大洋インド洋区内にある複数海域の分布量の検討を行った。さらに、試料採集数の多かった南極海域において見られた動物プランクトン分布の特徴について整理を試みた。

## 2. 材料及び方法

第 39 次および第 40 次日本南極地域観測隊 (以下それぞれ JARE-39, JARE-40 と略す) の夏期行動期間中に、「海洋生物モニタリング研究観測」の一環として「しらせ」航走中に海洋表層水中の動物プランクトン群集の連続的採集を実施した。

試料採集は、フリーマントル～昭和基地間 (往路), 及び昭和基地～シドニー間 (復路) において, JARE-39 では 1997 年 12 月 4 日～12 月 13 日 及び 1998 年 2 月 15 日～3 月 19 日に, JARE-40 では 1998 年 12 月 3 日～12 月 20 日 及び 1999 年 2 月 24 日～3 月 19 日に実施した

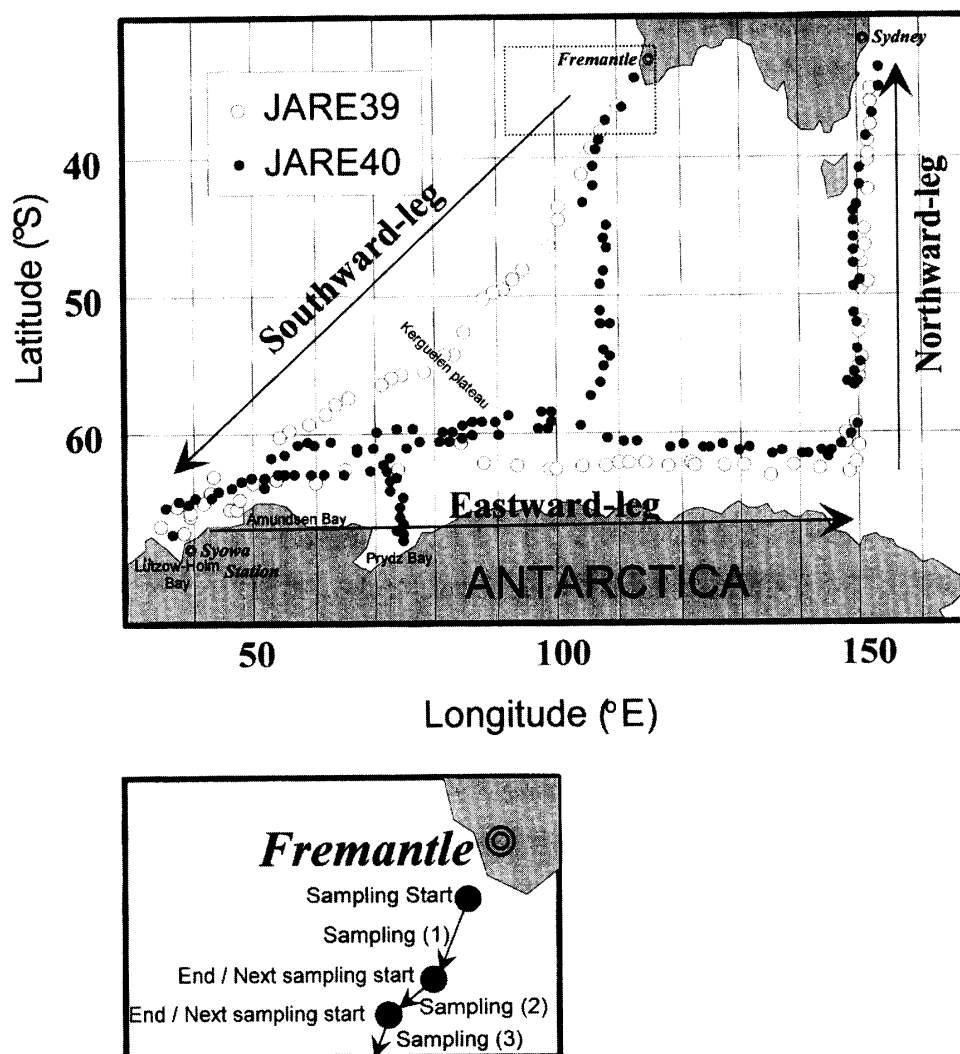


図1 南大洋インド洋区での「しらせ」の航路上における動物プランクトン連続採集開始及び終了点。連続採集は近接した2点間で実施している(一例を下側に拡大して表示)。白丸がJARE-39(1997年12月~1998年3月)、黒丸がJARE-40(1998年12月~1999年3月)。

Fig. 1. Zooplankton continuous sampling on icebreaker 'Shirase' during JARE-39 (Dec. 1997-Mar. 1998, open circles) and JARE-40 (Dec. 1998-Mar. 1999, closed circles). Circles indicate where continuous sampling of the surface zooplankton was started/ended (an example is illustrated in the lower panel).

(図1)。連続採集した動物プランクトン試料は、それぞれJARE-39往路の南下航路上において29試料、復路昭和基地から北上開始地点の東行航路上において41試料、北上航路上で28試料、JARE-40往路の南下航路上において47試料、復路東行航路上で58試料、北上航路上で28試料に区分して固定保存し、国内へ持ち帰った。

船底8mから連続揚水された海水(表層連続採水)をNGG54規格のプランクトンネット(目合、315 $\mu$ m)で任意時間濾過(開始/終了時刻を記録)し、動物プランクトン試料としてバイアル瓶中に収容すると同時に、その時の濾水量を記録した。濾過時間はおおむね4時間とす

ることを計画していたが(航行時の移動距離として 50 マイル前後),他の観測作業やネットの目詰まり処理などで,時に 3-8 時間の範囲となり,水平距離は停船ドリフト時の数マイルから航行時の最大約 100 マイルまで変化した。試料の固定保存のため試料体積の約 5% の中性フォルマリンを加え,室温保存した。

また,連続揚水された海水の一部を「しらせ」船内に設置された「表層海水モニタリングシステム」に導入し,各種航海情報と同時に水温・塩分などの時系列データを自動記録させ,本研究ではそのうちの船の位置情報,水温と塩分を解析に用いた。

「動物プランクトン生態研究法(大森・池田, 1976)」に基づき,フォルマリン固定保存試料中の動物プランクトンの湿重量測定を行った。各試料採集時の濾水量と上記測定で得た湿重量から,動物プランクトンの現存量を  $1\text{ m}^3$  あたりで算出した。

### 3. 結 果

#### 3.1. 往路における動物プランクトン現存量の水平分布(インド洋区亜熱帯, 亜南極, 極前線, 南極海域での初夏の動物プランクトン現存量)

JARE-39 では 1997 年 12 月 3 日フリーマントル出港後,南西に進路をとり昭和基地へ向けて航走した(図 1, 白丸 Southward-leg)。南緯  $46^\circ$  付近で南極～インド洋海嶺,南緯  $55^\circ$  付近でケルゲレン海台上を通過し,12 月 13 日に昭和基地沖南緯  $67^\circ$  の定着水域に到着した。JARE-40 では 1998 年 12 月 3 日にフリーマントルを出港,南緯  $60^\circ$  付近まで南下した。その後西南西に航路をとりブリッツ湾・アムンゼン湾に一時立ち寄りながら昭和基地へ向けて航走した(図 1, 黒丸 Southward-leg)。

JARE-39 の航路に沿った水温と塩分を緯度別に整理してみると,南緯  $40^\circ$  付近で亜熱帯収束線(Subtropical Front),南緯  $45^\circ$  付近で亜南極前線(Sub Antarctic Front),南緯  $51^\circ$  付近で南極極前線(Polar Front)を通過したと思われる  $2-3^\circ\text{C}$ ,  $0.3-1\text{ PSU}$  ほどの水温と塩分の大きな低下が認められており,また南緯  $53-57^\circ$  付近のケルゲレン海台でも水温・塩分がそれぞれ  $4^\circ\text{C}$  および  $0.5\text{ PSU}$  程度の変動が記録されていた(図 2 上)。これよりも高緯度側では水温はほぼ  $0^\circ\text{C}$  付近と安定していたのに比べ,塩分値は変動が大きく,しばしば  $0.3$  から  $0.6\text{ PSU}$  ほど低塩分側に変化していた。これはおそらく局地的な海水や氷山の融解に起因するものと考えられた。JARE-40 においても南緯  $37-39^\circ$  で亜熱帯前線,南緯  $44^\circ$  付近で亜南極前線,  $48^\circ$  付近で南極極前線を通過したと思われる  $2-3^\circ\text{C}$ ,  $0.3-1\text{ PSU}$  ほどの水温・塩分の急低下が認められた(図 2 下)。また,南緯  $41^\circ$ ,  $54^\circ$  および  $60^\circ$  前後でも約  $1^\circ\text{C}$ ,  $0.2\text{ PSU}$  程度の水温・塩分差のある水塊を通過した。

JARE-39 での動物プランクトンの現存量は,南緯  $43^\circ$  までは  $50\text{ mg/m}^3$  以下であったが,南緯  $44-55^\circ$  の間で  $100\text{ mg/m}^3$  以上の値がしばしば計測された(図 3 上)。南緯  $55-56^\circ$  付近で得た 3 試料は,  $500\text{ mg/m}^3$  前後の高い現存量を示し,試料中には動物プランクトンのほか,大型の

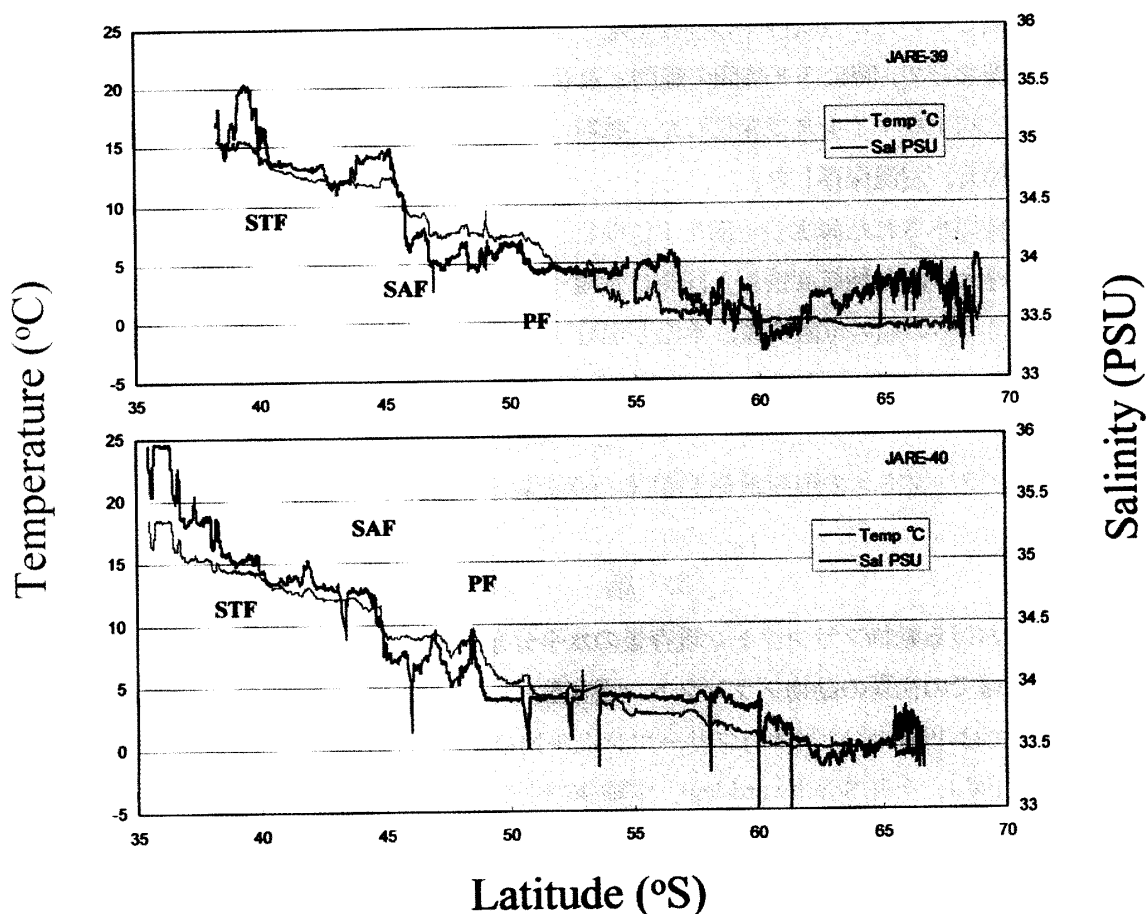


図2 JARE-39 および JARE-40 往路南下航路上の表層水の水温と塩分の変化  
白抜きの部分は海洋前線 (STF: 亜熱帯前線, SAF: 亜南極前線, PF: 南極極前線) に相当し, これらによって隔てられる亜熱帯海域, 亜南極海域, 極前線海域, 南極海域をそれぞれオレンジ, 緑, 水色, 青色背景で表示した。

Fig. 2. Changes of temperature and salinity in the surface water along the Southward-leg of JARE-39 (upper) and JARE-40 (lower).

Orange, green, sky-blue and blue background colors in the figure indicate Subtropical, Sub-Antarctic, Polar Frontal and Antarctic Zones, respectively.

STF: Subtropical Front, SAF: Sub-Antarctic Front, PF: Polar Front.

群体をつくる珪藻類も混在していた。南緯 56° を過ぎ南下を始めると, 大きな変化はなくなり, 再び 50 mg/m<sup>3</sup> 以下の範囲となっていた。一方, JARE-40 の動物プランクトンの現存量は, 南緯 38-47° と南緯 60° 付近において特に高くなっており, 600 mg/m<sup>3</sup> 以上となった (図 3 下)。南緯 60° 付近 (プリッツ湾東沖, 東経 100 度付近) で 1,000 mg/m<sup>3</sup> をこえた試料中にはオキアミが多量に採集されており, これが現存量を特に大きなものとしていた。また, 南緯 55° から 60° までの間は現存量が漸減し, 60° 付近で最大値をとる直前の試料は, この航路上の最小値 (13.4 mg/m<sup>3</sup>) を記録していた。

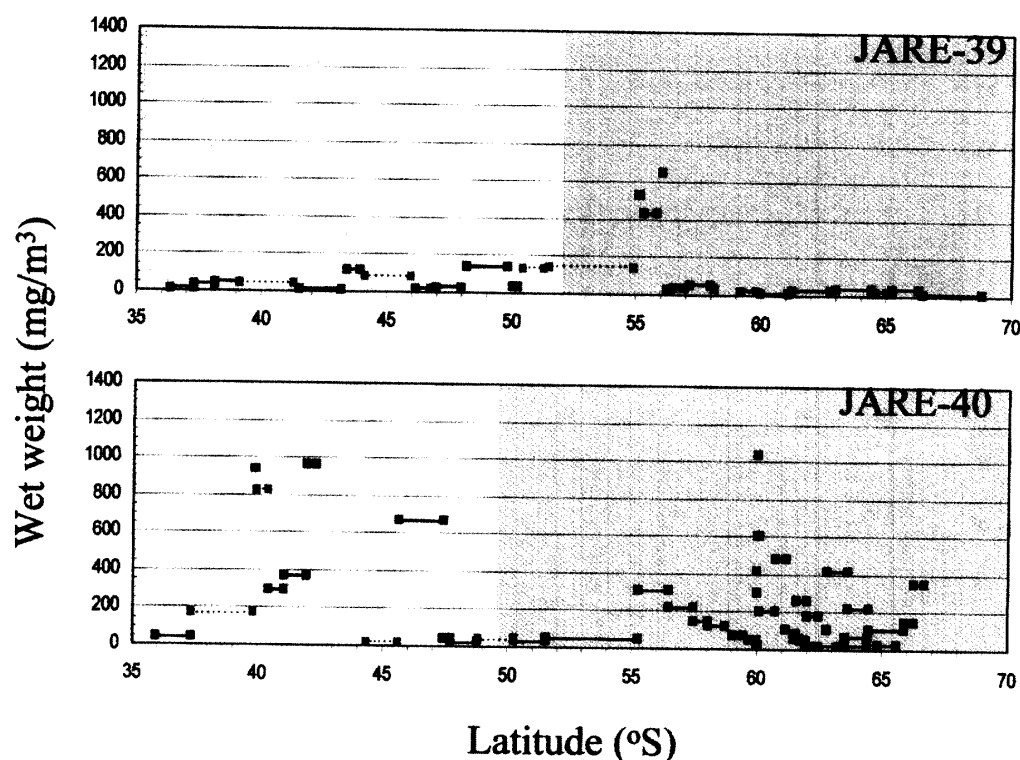


図3 JARE-39 および JARE-40 往路南下時における表層水中の動物プランクトン現存量  
試料採集区間の緯度に対して現存量を表示 (採集開始/終了点を■で, 採集区間を直線  
で表示). 海洋前線通過時に得られた値は赤で表示. 背景色は図2と同様の意味.

Fig. 3. Zooplankton biomass (wet weight,  $\text{mg}/\text{m}^3$ ) in the surface water of Southward-leg, JARE-39 (upper) and JARE-40 (lower).

The biomass was plotted against latitude. Square marks of line edges are starting/ending points of sampling. Red marks (lines) indicate that the data were obtained around ocean fronts. Background colors in the figure express the same meaning as in Fig. 2.

### 3.2. 復路東行航路における海域の水温・塩分変化と動物プランクトン群集量の水平分布 (南極海域内での晩夏の動物プランクトン現存量)

JARE-39 では 1998 年 2 月 15 日に昭和基地をはなれ, 途中アムンゼン湾に立ち寄りながら東に進路をとり, 東経  $150^\circ$  までほぼ南緯  $64^\circ$  に沿って航走した (図 1, 白丸 Eastward-leg). 一方 JARE-40 では 1999 年 2 月 24 日に昭和基地を離れた後, アムンゼン湾沖を経由した後に南緯  $63\text{--}64^\circ$  に沿って東に進路をとり, 東経  $75^\circ$  付近で南下し, 3 月 2 日にブリッツ湾に到達した. その 2 日後にブリッツ湾を出て再び東に進路をとり, 東経  $150^\circ$  付近までほぼ南緯  $60^\circ$  に沿って航走した (図 1, 黒丸 Eastward-leg).

JARE-39, 40 とともに昭和基地沖を出港してからほぼ緯度沿いに東行したため, 海洋前線などの水温差がおおきな水塊を横断することがなく, おおむね水温は  $2\text{--}3^\circ\text{C}$  で塩分が  $33\text{--}33.5$  PSU 前後を示していた (図 4). ただし, JARE-39 では昭和基地出発後からアムンゼン湾までの間に水温が  $1^\circ\text{C}$  前後で塩分値が  $32$  PSU を中心に  $0.8$  PSU ほどの幅で大きく変動しており, その後も

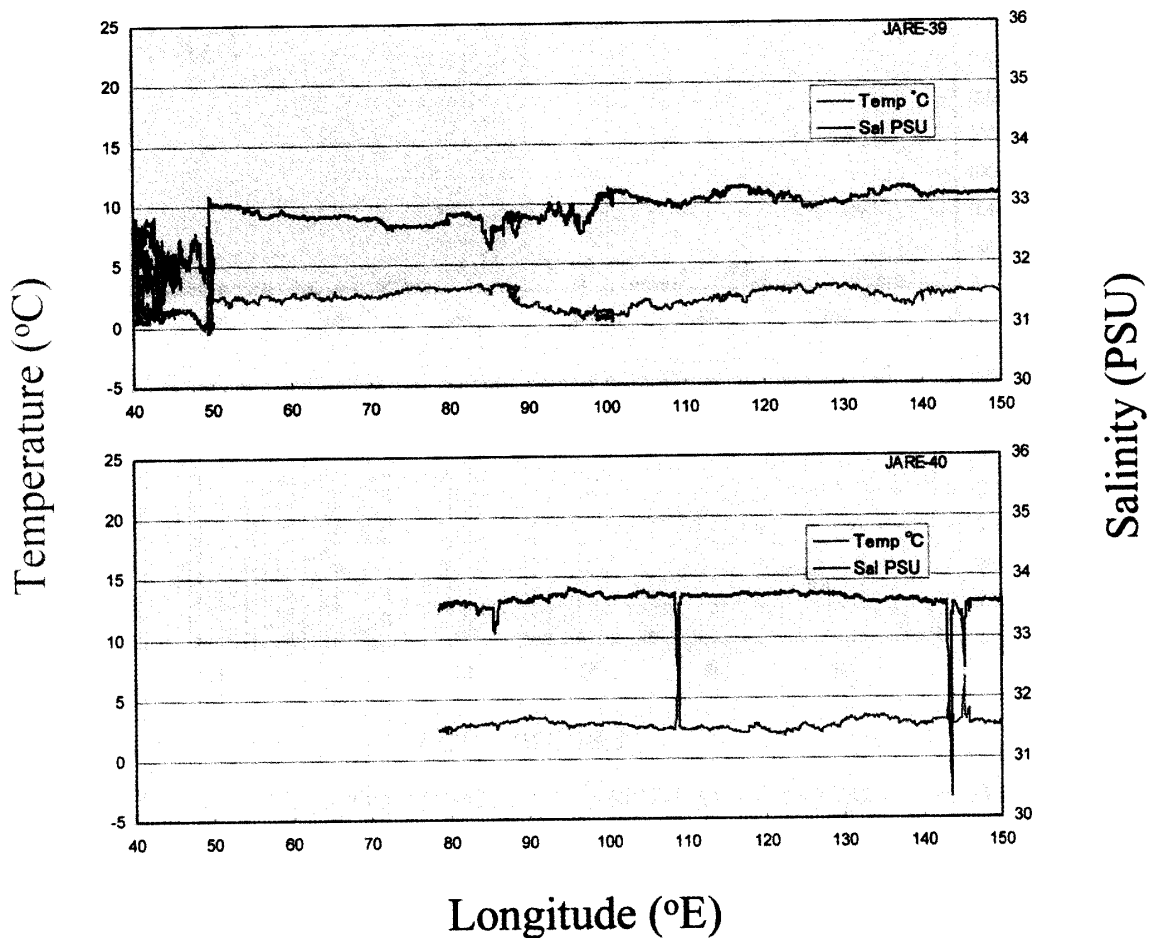


図4 JARE-39 および JARE-40 復路東行航路上の表層水の水温と塩分の変化  
青色背景はこの航路上が南極海域であることを意味する。

Fig. 4. Changes of temperature and salinity in the surface water along the Eastward-leg of JARE-39 (upper) and JARE-40 (lower).

Blue background color in the figure indicates that the Eastward-leg was in the Antarctic Zone.

JARE-40 よりも高緯度側の海氷・冰山存在の影響を受けやすい海域を航行したためか、しばしばやや低温で低塩分の海域を通過していた。JARE-40 では東経 40°-75° 間の水温・塩分情報は測定機器の動作不良のため欠測したため、大陸沿岸部付近のデータは不明であるが、それ以降の東経 75°-150° 間では JARE-39 より沖合いを航行していたためか、前年よりもやや塩分の高い水域（水温は同程度）を航行した。

JARE-39 では東経 50° のアムンゼン湾沖、65° のプリッツ湾沖と東経 75°-87° の海域で 200 mg/m<sup>3</sup> 以上の動物プランクトンが記録されたほかは、いずれの海域でも 200 mg/m<sup>3</sup> を超えることはなかった（図 5 上）。JARE-40 でも JARE-39 と同様にアムンゼン湾、プリッツ湾、および東経 75°-100° にかけて動物プランクトン現存量が 200 mg/m<sup>3</sup> を超える大きな値をとった（図 5 下）。また、二つの航海で東経 110°-150° 間で得られた JARE-40 における値が JARE-39 試



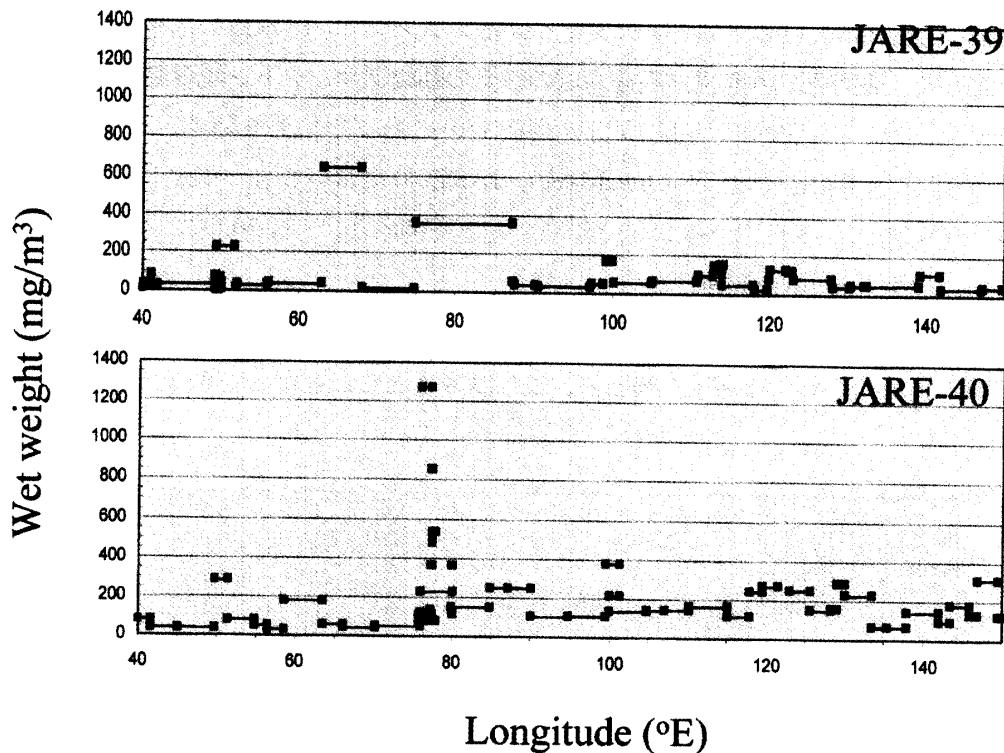


図5 JARE-39 および JARE-40 復路東行時における表層水中の動物プランクトン現存量  
試料採集区間の緯度に対して現存量を表示 (採集開始/終了点を■で、採集区間を直線  
で表示)。背景色は図4と同様の意味。

Fig. 5. Zooplankton biomass (wet weight,  $\text{mg}/\text{m}^3$ ) in the surface water of the Eastward-leg, JARE-39 (upper) and JARE-40 (lower). The biomass is plotted against latitude. Square marks of line edges are starting/ending points of sampling. Blue background color in the figure expresses the same meaning as in Fig. 4.

料のそれよりも2倍ほど大きな値となっていた。

JARE-40ではこの復路東行航路上の東経40度-100度に沿った航路を往路においておよそ2カ月前に通過していた事になる。JARE-40往路において南緯60°付近に沿って西へ向かったときに得られた現存量、および復路に昭和基地を離れ東へ向かう際に得られたこの航路上の現存量は約2カ月前の試料採集時期の季節的差異にもかかわらず、ともに $200 \text{ mg}/\text{m}^3$ 前後と大差ないものであった。ともに $1000 \text{ mg}/\text{m}^3$ を超えるような現存量値を1度ずつ記録し、その高密度分布域は往路ではプリッツ湾東沖 (南緯60°, 東経100°付近) であったのに対し、復路ではプリッツ湾内で記録されたという地理的な違いがあった。ただし、往路に高密度分布が確認されたプリッツ湾東沖 (南緯60°, 東経100°付近) では復路においとも $200\text{--}400 \text{ mg}/\text{m}^3$ の比較的高密度の動物プランクトン現存量が確認されたこと、同様に復路で $1000 \text{ mg}/\text{m}^3$ を超えたプリッツ湾内では往路においても $100\text{--}450 \text{ mg}/\text{m}^3$ の範囲の比較的高密度を示していたことから、動物プランクトンの現存量が比較的高い区間はほぼ一致して認められた。

### 3.3. 復路北上航路における水温・塩分変化と動物プランクトン群集量の水平分布 (インド洋区亜熱帯, 亜南極, 極前線, 南極海域の晩夏の動物プランクトン現存量)

JARE-39 においては 1998 年 3 月 13 日に東経 150° に沿って北上を開始, 3 月 19 日にシドニー沖へ到着した (図 1, 白丸 Northward-leg). JARE-40 においても一年後のほぼ同じ時期に相当する 1999 年 3 月 12 日に東経 150° に沿って北上を開始し, 3 月 20 日にシドニー沖へ到着した (図 1, 黒丸 Northward-leg).

JARE-39, 40 とも南緯 55-57° 付近で南極極前線と思われる温度・塩分差がそれぞれ 2°C 及び 0.5 PSU ほど大きく上昇する海域を横断し, これ以降北上にともなって水温と塩分は細かな変

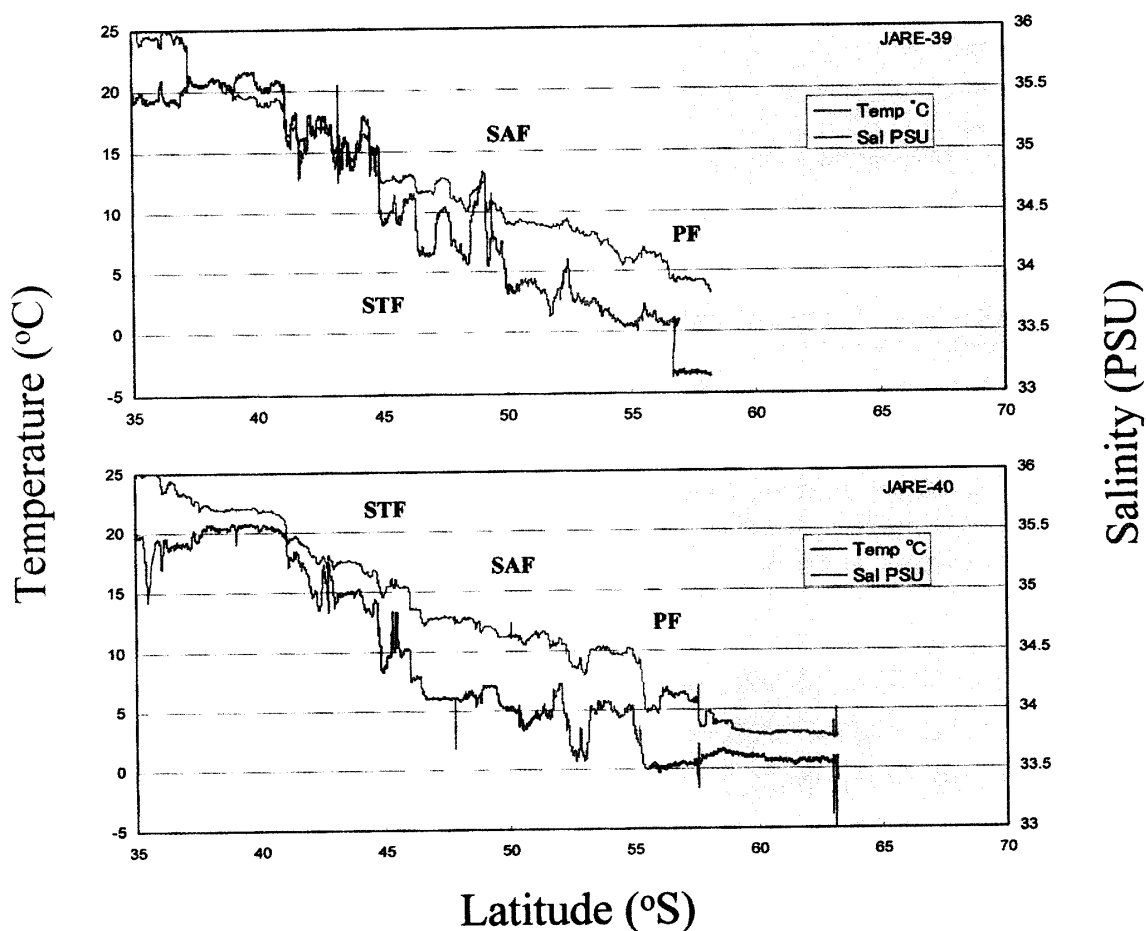


図 6 JARE-39 および JARE-40 復路北上航路上の表層水の水温と塩分の変化  
白抜きの部分は海洋前線 (STF: 亜熱帯前線, SAF: 亜南極前線, PF: 南極極前線) に相当し, これらによって隔てられる亜熱帯海域, 亜南極海域, 極前線海域, 南極海域をそれぞれオレンジ, 緑, 水色, 青色背景で表示した。

Fig. 6. Changes of temperature and salinity in the surface water along the Northward-leg of JARE-39 (upper) and JARE-40 (lower).

Orange, green, sky-blue and blue background colors in the figure indicate Subtropical, Sub-Antarctic, Polar Frontal and Antarctic Zones, respectively.

STF: Subtropical Front, SAF: Sub-Antarctic Front, PF: Polar Front.

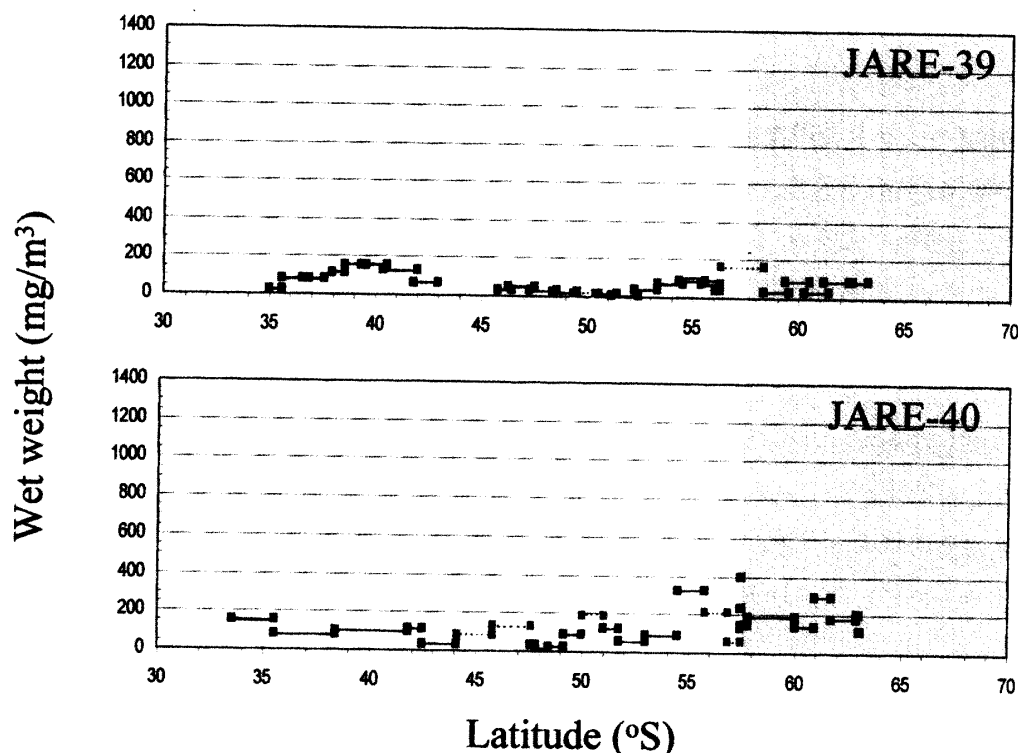


図7 JARE-39 および JARE-40 復路北上時における表層水中の動物プランクトン現存量  
試料採集区間の緯度に対して現存量を表示 (採集開始/終了点を■で、採集区間を直線  
で表示)。海洋前線通過時に得られた値は赤で表示。背景色は図6と同様の意味。

Fig. 7. Zooplankton biomass (wet weight,  $\text{mg}/\text{m}^3$ ) in the surface water of the Northward-leg, JARE-39 (upper) and JARE-40 (lower).

The biomass is plotted against latitude. Square marks of each line were starting/ending point of sampling. Red marks (lines) indicate that the data were obtained around ocean fronts. Background colors in the figure express the same meaning as in Fig. 6.

動を繰り返しながら徐々に増加していった。南緯 45–50° は水温が 10–15°C で塩分が 34.0–34.5 psu の亜南極海域、40–45° 間は水温が 15–20°C で塩分が 34.5–34.8 psu の亜熱帯海域に相当すると思われる海域を通過していたが、それらの境界部分は複雑に入り組んでいるようであった (図 6)。

動物プランクトン現存量は JARE-39 では  $200 \text{ mg}/\text{m}^3$  の範囲内で、同航海で他の観測航路上の結果よりも変動幅が小さく、かつ、隣接試料間での差も小さなものであった (図 7 上)。特徴的な変化としては南緯 45–53° 間での現存量が  $50 \text{ mg}/\text{m}^3$  以下と小さいこと、南緯 40 および 57° を中心として緯度にして 2–3° の範囲で  $150 \text{ mg}/\text{m}^3$  以上の値を示した。

JARE-40 では、南緯 55° 付近よりも高緯度側で  $200 \text{ mg}/\text{m}^3$  をこえる大きな値がみられ、南緯 50° よりも低緯度側では  $200 \text{ mg}/\text{m}^3$  を超える値は記録されなかった (図 7 下)。JARE-39 で得られたものと比較すると、南緯 50° 以北の低緯度側での現存量にはほとんど差がなく、これよりも高緯度側での現存量が 2 倍程度大きくなっていた。

## 4. 考 察

### 4.1. 動物プランクトン現存量の同一海域内での不均一性

JARE-39, 40 航海を通じ、もっとも動物プランクトン現存量が少なかったのは、JARE-39 東行航路上、南緯 67° 東経 50° 付近で、その値は  $1.3 \text{ mg/m}^3$  であった。逆に、もっとも高密度分布が捉えられたのは JARE-40 東行航路上の南緯 65° 東経 76° 付近で、 $1275 \text{ mg/m}^3$  であった (図 2, 4)。これら二つの採集域は南極海域に位置し、南極大陸からの距離や採集実施時期も季節的にはほとんど同じであったという共通性をも持つ。このことは海洋特性としてはほぼ同じ海域に属し、採集季節もほぼ同じでありながら、実に 1000 倍もの分布量の差が 2 回の航海間で生じていたことを示すものである。

現存量に極めて大きな差が見られるという現象は、同一航路上においての隣接した試料間にも多数認められている。JARE-39 往路における南緯 56° 付近、JARE-40 往路における南緯 60° 付近 (図 2, 4) などがその典型例でもある。先の例は同一海域に属しながらも表層水中の動物プランクトン現存量が 1000 倍程度の年較差が生じていたことを示すのに対し、これらの例は同一海域内で連続採集した数時間の移動距離 (50 マイル前後) で、動物プランクトン現存量が表層水中において数 100 倍もの粗密差を生じさせるほど、不均一分布をとっていたことを意味している。これらのことは、南大洋での動物プランクトン現存量推定において単発的な数限られた試料採集のみのデータに基づく場合、たとえ同一と思われる海域内でも二桁以上の推定誤差を伴う危険があることを意味している (参考, Hardy 1936a, b)。

### 4.2. 各観測航路上で見られた現存量変動の特徴

本研究では航路に沿った動物プランクトン現存量を整理するにあたり、試料採集時期と海域の相違に基づいて、便宜的に往路、復路東行、復路北上航路の三つに区分した (図 1, 表 1)。往路の観測を実施した時期は南半球の初夏に相当する季節に複数の海域を横断し観測したものであり、復路東行航路は晩夏から初秋に南極海域内、北上航路上では秋に複数の海域を横断し観測したことになる。表 1 には本研究のそれぞれの航路上で得られた動物プランクトン現存量の平均値を記している。JARE-39 と JARE-40 を比較するとすべての航路において後者のほうが約 2 倍ほど大きな値となっていたことがわかる。

往路ではいくつかの採集区間で動物プランクトン現存量が  $500 \text{ mg/m}^3$  を超えるような際立った高密度分布域が認められた。JARE-39 往路のケルゲレン海台付近 (南緯 56° 前後)、JARE-40 往路上の南緯 40-42°, 46°, 60° がこれに相当する。これらの採集域前後では大きな水温・塩分変化があることが記録されていた。これらの水温・塩分差は、その位置を過去の観測知見と照合させると、異なった水塊構造をもつ海域が接する海洋前線に相当するか、あるいは深層水が湧昇してくる領域に相当していたと考えられる (Nagata *et al.*, 1983; Odate and

**表 1** JARE-39 および JARE-40 夏季行動中に「しらせ」航路上 (3 航路: 南下 (フリーマントル～昭和基地), 東行 (昭和基地～東経 150°), 北上 (南緯 60° 付近～シドニー)) で得られた表層水中の動物プランクトンの現存量

*Table 1. Biomass of net-zooplankton (wet weight, mg/m<sup>3</sup>) in the surface water along the three icebreaker 'Shirase' cruise tracks (Southward-leg: Fremantle-Syowa Station, Eastward-leg: Syowa Station-150° E, Northward-leg: 60-64° S of 150° E-Sydney (34° S)). The samples were collected continuously from a pump (sampling depth, ca. 8 m), and concentrated with NGG-54 plankton netting (mesh size, 315 μm) for several hours. Nearly twice higher biomass were recorded in every legs in JARE-40's than those of JARE-39's.*

動物プランクトン Zooplankton (mg/m <sup>3</sup> )	南下航路 Southward-leg (Fremantle-Syowa Station)	東行航路 Eastward-leg (Syowa Station- 64° S 150° E)	北上航路 Northward-leg (64° S 150° E- Sydney)
<b>JARE-39</b>			
平均値 (mean)	93.7	84.8	70.2
標準偏差 (S.D.)	160.6	110.8	45.0
Maximum	649.3	638.8	163.3
Minimum	6.6	1.3	11.9
サンプル数 (n)	29	41	26
<b>JARE-40</b>			
平均値 (mean)	227.4	200.6	138.6
標準偏差 (S.D.)	271.8	206.9	92.5
Maximum	1030.1	1274.7	396.9
Minimum	13.4	26.0	15.1
サンプル数 (n)	47	57	28

Fukuchi, 1995a, b). 本研究海域の海洋前線付近や湧昇域は生物生産性が高いといわれており (Fukuchi and Tamura, 1982), 今回捉えられた動物プランクトンの高密度分布はこれら高い生物生産が行われていた海域に対応していたものと思われる。ただし、水温・塩分差の大きな海域の通過前後に必ずしも動物プランクトン現存量が大きくなるわけではないようである。JARE-39 往路において、水温・塩分変化から亜熱帯前線、亜南極前線、極前線、南極極前線を通過したと推察されるシグナルは明瞭なのであるが、それらの領域通過時の動物プランクトン現存量はその前後と比較しても大差ないものであった。

前線通過前後で得られた値を除き、2 航海で相反する現象として、JARE-39 往路上では南緯 55° よりも高緯度域での分布量が小さいのに対し、JARE-40 では他の低緯度海域よりも大きな値をとるものが多くなっていたことがあげられる。この高緯度側での現存量の差が大きく影響し、全往路 (南下航路) を較べた場合でも、JARE-40 のほうが平均値で 2 倍以上大きな値となった (表 1)。JARE-39 では昭和基地到着が JARE-40 よりも 1 週間ほど早かった。この観測時期の季節的ずれが平均値の差を生じさせていた可能性もある。JARE-39 では高緯度海域の盛夏に向かって顕著に活発化する生物生産活動の早期を捉えたため、動物プランクトンの生物量増加までにはいたっていなかったことに対し、JARE-40 では 1 週間ほどあとの生物量増加が比較的高まった部分を観測したため、大きな差が生じた可能性があるからである。JARE-39

および -40 往路での南極大陸に程近い南緯 55-65° 前後の水温・塩分をみると、JARE-39 において相対的に低温で塩分濃度が高く、JARE-40 が高温・低塩分である事から (図 3, 5), JARE-40 の高緯度部分では季節海水の融解がより進行し、なおかつ日射により表層水が暖められていたということまでは本研究のデータが示すところである。このような観測時期のずれは生物活動期間が海水の存在で制限されやすい高緯度季節海水域においては軽視できないものと思われる。

本研究で東行航路として整理した海域は、ほぼ南緯 60-64° の南極大陸沿いに位置するいわゆる南極海域内である。この航路は冬季に季節海水が存在する境界領域に相当する。この海域において JARE-39, 40 とも南半球の晩夏に相当する 2 月中下旬に観測を実施した。いずれの観測においても東経 75-110° 付近のブリッツ湾内、真北沖から東沖にかけて動物プランクトンが高密度に存在していた。ブリッツ湾東沖において動物プランクトン量が大きくなることは、これまでの日本南極地域観測隊の定点観測結果を取りまとめた Takahashi *et al.* (1998),あるいはそれ以前の Voronina (1967) の報告と同様の事象である。同海域の動物プランクトン量が周辺の同緯度海域よりも大きいという事実を、今回の 2 年にわたる表層水中の動物プランクトン連続採集でも確認したことになる。ブリッツ湾北沖は夏季に周辺海域よりも植物プランクトン量も大きくなる海域でもあり (Suzuki and Fukuchi, 1997), この大きな植物プランクトン量が高密度の動物プランクトンの存在を支えている可能性が高いと推察される。ただし、この海域よりもわずかに西側、東経 70° 前後では動物プランクトン量はこの 2 年間ともきわめて低く、高密度分布域と低密度分布域がブリッツ湾沖で隣接して存在していることは非常に興味深いことである。

東行航路上のこの他の区間においては、アムンゼン湾沖を除き東経 40-60° 間の分布量が東経 110° 以東よりも小さいのが特徴で、2 年間とも東経 40-60° 間は 110° 以東より大陸沿岸側を航行したため、動物プランクトン現存量は南極大陸沿岸では沖合いよりも小さくなる傾向 (Foxton, 1956; Hosie, 1994; Hosie *et al.*, 1997; Takahashi *et al.*, 1998) を捉えた可能性が高いと推察される。また、東経 110°-150° の海域においては JARE-39 で 100 mg/m<sup>3</sup>, JARE-40 では 200 mg/m<sup>3</sup> を中心に変動し JARE-40 での現存量が 2 倍ほど大きくなっていたが、この理由としても JARE-39 航路がより大陸側であった結果、先述したような南極海域内では大陸沿岸よりほど動物プランクトン量が少なくなる傾向を捉えた可能性もある。南極海域では大陸に近いほど季節海水の存在期間が長く、そのため海洋表層に入射する光エネルギー量が少なくなってしまう。このことが植物プランクトンの光合成活動による基礎生産を沖合部よりも短期間化させてしまうと考えられ、結果として沿岸部では沖部よりも生物生産量が大きくなりえず、このことが沖合いと沿岸近くでの動物プランクトン現存量差に反映された可能性がある。

北上航路上では JARE-40 の高緯度側で JARE-39 よりも顕著に大きな値をとりながら変動しているのが特徴である。南緯 60-50° にかけての水温・塩分変化をみると JARE-39 では南

緯 57° 付近で大きな塩分水温不連続面を横断したのに対し, JARE-40 においてはそれが南緯 55-57° 付近で入り組んでおり, さらに南緯 55° 通過後の温度上昇が 10°C に達するなど, 前者よりも 3°C も水温上昇率が大きいことなどから, JARE-40 においては極前線海域に相当する海域がきわめて複雑な水塊構造をしていたと判断される. すなわち, JARE-40 の高緯度側の試料は前年よりも複雑に海洋前線が入り組んだような場で採集されたため, 前線域で活発化することの多い生物生産が動物プランクトン現存量を高めていた可能性もある.

以上のことから導き出された考察をまとめると, インド洋区の南北断面では海洋前線や水温・塩分の急激な変化が生じている区間付近で動物プランクトン現存量が大きくなりがちなこと, また, ケルゲレン海台やプリッツ湾沖など南極海域内のいくつかの場所で 2 航海を通じて共通して現存量が高い場所が存在すること, および, 南極海域の沿岸付近と沖合部では現存量差がありそうなことがあげられる. これらは過去の知見などとあわせて考えると, いずれも生物 (基礎) 生産性の大小と深く関わる現象と推察される.

#### 4.3. 南大洋インド洋区の各海域の動物プランクトン現存量

本研究で扱った南大洋インド洋区の動物プランクトン現存量に関して, Takahashi *et al.* (1998) は海洋前線で区分される亜熱帯海域・亜南極海域・極前線海域・南極海域の四つに区分し, それぞれの平均値を比較検討し, 亜熱帯海域から極前線海域にかけて現存量の平均値が増加する傾向があること, 極前線域で最大となり, 南極海域は極前線域よりも動物プランクトン量がやや少ないことを指摘した. 本研究の結果をこれらの海域に対応させて平均値と標準偏差を求めてみたのが, 表 2 である. 図 2, 4, 6 の水温・塩分変化に基づき, それぞれの海域を区分したが, 各海洋前線通過時に得られたデータ (図 3, 5, 7 に赤で表示) は, どちらの海域に由来するものか判断できないという理由で, 表 2 および後述する表 3 の解析においては割愛してある.

本研究で得られたデータは Takahashi *et al.* (1998) のデータ同様に同一海域内でもきわめて大きく変動していたが, 求められた平均値は相互の研究で酷似していた. 彼らが平均値の推定に利用した個々のデータが不明であるために, 今回の研究で得られた各海域の平均現存量と間の有意差検定は直接実施できないものの, それぞれの海域での平均現存量はほとんど等しく, 極前線海域において 2.5 倍ほどの差異を示すにとどまった. 本研究では現存量が亜熱帯海域から高緯度海域にかけて徐々に大きくなっており, 極前線海域よりも南極海域で最大となったのが Takahashi *et al.* (1998) の結果とわずかに異なるところである. この違いは今回実施したサンプリング方法と従来のプランクトンネット採集との手法の差に起因する可能性がある. 動物プランクトンの鉛直分布に差異があった場合, 今回のようなある一定水深のみからの試料採集では, ネット鉛直採集法よりも現存量を過小あるいは過大評価する場合が生じやすいと予想されるからである. この問題に関しては今後水深ごとに区分採集などを実施して鉛直分布に

表2 海洋前線で区分した4海域(亜熱帯, 亜南極, 極前線, 南極海域)における動物プランクトンの現存量 ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ). Takahashi *et al.* (1998) のデータとの比較.

Table 2. Mean net-zooplankton biomass (wet weight/ $\text{m}^3$ ) at the surface in the 4 water types in the Indian Ocean sector of the Southern Ocean.

海域 (Area)	Takahashi <i>et al.</i> (1998)			Present results		
	試料数 ( <i>n</i> )	平均値 (mean)	標準偏差 (S.D.)	試料数 ( <i>n</i> )	平均値 (mean)	標準偏差 (S.D.)
亜熱帯海域 Subtropical Zone	34	36.4	45.1	13	50.3	39.3
亜南極海域 Sub-Antarctic Zone	27	79.4	75.9	16	67.6	74.7
極前線海域 Polar Frontal Zone	31	172.5	200.5	21	75.7	73.5
南極海域 Antarctic Zone	259	133.9	176.6	162	136.9	155.1
インド洋区 Indian Sector	351	124.0	167.4	212*	120.8*	139.8*

\* 前線通過時に得られた 16 試料のデータを除く.

\* Total number of samples, mean biomass and standard deviation of the zooplankton biomass in the Indian Sector were calculated without using the 16 data (red marks in Figs. 3, 5 and 7) that were obtained around ocean fronts.

関する研究を実施して検証していく必要がある事象である.

しかしながら, 過去 20 年以上にわたる NORPAC 標準ネット採集で得られたデータの平均現存量と船底 8 m の一定水深から揚水し推定した各海域の平均現存量との間には極前線海域の値を除くとその差はほとんどない. このことは初夏から初秋の南大洋インド洋区の動物プランクトンは水深 8 m の現存量と表層から水深約 150 m までを積算し平均化したときの現存量との間に大きな差はなかったことを意味するものである. 南極海域の動物プランクトンは早春に深層部から浮上し, 一次生産の高まる夏季に表層水中で盛んにそれらを捕食・生長し, 晩秋に再び深層部へ潜行して越冬するというライフサイクルを営むものとする, 本研究実施期間が動物プランクトンが海洋表層において活発に活動している時に相当していたため, 両者に大きな差が生じさせなかったのかもしれない. 海洋表層における動物プランクトンの現存量を高頻度の試料採取で推定した今回の研究によって得た値が, 過去 20 数回にわたる航海で得られた値とほぼ同じであったということは, 本航路上においての夏期間を中心とした動物プランクトン現存量の推定に, 本手法が適用できることを強く示すものである.

本研究で得られた各海域間の動物プランクトン現存量を Mann-Whitney の U-検定で有意差検定を行ってみたのが表 3 である. 平均値としては 2-3 倍程度の差があった亜熱帯海域と南極海域, および極前線海域と南極海域間には現存量に明らかに有意差が認められ ( $p < 0.05$ ), また, 亜南極海と極前線海域間にも顕著とまではいえないものの  $p$  値は 0.06 程度で大きな隔たりがあることを意味しており, これらより, 南大洋インド洋区の動物プランクトン現存量は, 少なくとも南極海域では亜熱帯海域および極前線海域よりも大きく, また亜南極海域よりも極



**表3** 本研究で4つの海域で得られた動物プランクトン現存量の有意差 (Mann-Whitney のU検定) 検定結果.

*Table 3. Results of Mann-Whitney's U-test of the difference of zooplankton biomass among the four areas (Sub-Tropical Zone, Sub-Antarctic Zone, Polar Frontal Zone and Antarctic Zone) in the Indian Ocean sector during the JARE-39 and -40 cruises.*

	亜熱帯海域 Sub-Tropical Zone	亜南極海域 Sub-Antarctic Zone	極前線海域 Polar Frontal Zone	南極海域 Antarctic Zone
亜熱帯海域 Sub-Tropical Zone		0.2542	0.2798	0.0053**
亜南極海域 Sub-Antarctic Zone	0.2542		0.8541	0.0599*
極前線海域 Polar Frontal Zone	0.2798	0.8541		0.0299**
南極海域 Antarctic Zone	0.0053**	0.0599*	0.0299**	

\*10% レベルで有意差あり (Significantly different under 10% level).

\*\*5% レベルで有意差あり (Significantly different under 5% level).

前線海域の分布量が明らかに大きなものであったといえる。

また、先にも述べたが、2年間の観測成果をまとめた本研究から、南極海域の中ではいくつかの分布量が極めて大きくなる水塊が存在すること、また、沿岸部ほど分布量が小さく、沖合いに向かって分布量が増大する傾向を指摘し得た。停船観測を行わなければならない従来の試料採取方法に比べ、本手法は限られた観測船「しらせ」の行動時間を要求せずに高頻度に試料が得られるという性質上、表層での動物プランクトン分布のモニタリング研究観測にとってきわめて有効な手法であり、単一航海においても現存量推定に利用できるものである。今後、同手法を長期間繰り返すことにより、現在の「しらせ」航路上における表層の動物プランクトン現存量の各航海間での周期的変動性などに対する解析も可能となり、近年話題となっている南極海における海洋環境変動の周期性に対する動物プランクトンの応答性 (Takahashi *et al.*, 1998) に関しても言及できるようになると思われる。

## 謝 辞

本研究は第39次及び第40次南極地域観測隊夏季行動の一環として、生物・医学部門が実施した第V期五カ年計画「モニタリング研究観測：海水圏変動に伴う極域生態系変動モニタリング」の一観測項目として企画・実施されたものである。船上での観測を支援していただいた観測船「しらせ」帖佐 (39次)・茂原 (40次) 艦長をはじめ乗組員、および第39, 40次南極地域観測隊員の諸姉・諸兄に感謝する。

## 文 献

Baker, A. de A. (1954): The circumpolar continuity of Antarctic plankton species. *Discovery Rep.*, **27**,

- 201-218.
- Brodskii, K.A. (1964): Plankton studies by the Soviet Antarctic Expedition (1955-1958). *Sov. Antarct. Exped. Inf. Bull.*, **1**, 105-110.
- Brodskii, K.A. (1968): Distribution and size variability of species of Calandiae (Copepoda) in the Southern Hemisphere. *Biological Report of the Soviet Antarctic Expedition (1955-1958)*, Vol. 3, ed. by A.P. Andriashev and P.V. Ushakov. Tr. by Israel Program for Scientific Translation. Jerusalem, IPST, 190-219 (Studies of Marine Fauna IV (VII)).
- Foxton, P. (1956): The distribution of the standing crop of zooplankton in the Southern Ocean. *Discovery Rep.*, **28**, 191-236.
- Fukase, S. (1962): Oceanographic condition of surface water between the south end of Africa and Antarctica. *Nankyoku Shiryo (Antarct. Rec.)*, **15**, 53-110.
- Fukuchi, M. and Tanimura, A. (1981): Plankton samplings on board Fuji in 1972-1980. *JARE Data Rep.*, **60** (Mar. Biol. 1), 27 p.
- Fukuchi, M. and Tamura, A. (1982): Chlorophyll *a* distribution in the Indian sector of Antarctic Ocean in 1978-1979. *Nankyoku Shiryo (Antarct. Rec.)*, **74**, 143-162.
- Hardy, A.C. (1936a): The continuous recorder. *Discovery Rep.*, **11**, 457-510 with 4 pls.
- Hardy, A.C. (1936b): Observations on the uneven distribution of oceanic plankton. *Discovery Rep.*, **11**, 511-538.
- Hosie, G.W. (1994): The macrozooplankton communities in the Prydz Bay region, Antarctica. *Southern Ocean Ecology: The BIOMASS Perspective*, ed. by S.Z. El-Sayed. Cambridge, Cambridge Univ. Press, 93-123.
- Hosie, G.W., Cochran, T.G., Pauly, T., Beaumont, K.L., Wright, S.W. and Kitchener, J. (1997): Zooplankton community structure of Prydz Bay, Antarctica, January-February 1993. *Proc. NIPR Symp. Polar Biol.*, **10**, 90-133.
- 河村章人 (1971): 南極海の海洋生物. *海洋科学*, **3**, 493-502.
- Nagata, Y., Michida, Y. and Umiura, Y. (1983): Variation of positions and structures of the oceanic fronts in the Indian Ocean of the Southern Ocean in the period from 1965 to 1987. *Antarctic Ocean and Resources Variability*, ed. by D. Sahrhage. Berlin, Springer, 92-98.
- 大森 信・池田 勉 (1976): 動物プランクトン生態研究法. 東京, 共立出版, 229 p. (生態学研究講座, 5).
- Odate, T. and Fukuchi, M. (1995a): Physical and chemical properties of surface water in the Southern Ocean in summer 1991/92. *Proc. NIPR symp. Polar Biol.*, **8**, 77-86.
- Odate, T. and Fukuchi, M. (1995b): Distribution and community structure of picophyto- plankton in the Southern Ocean during the late austral summer of 1992. *Proc. NIPR Symp. Polar Biol.*, **8**, 87-100.
- Suzuki, T. and Fukuchi, M. (1997): Chlorophyll *a* concentration measured with a continuous water monitoring system during the cruise to Syowa Station, Antarctica, JARE-27 (1985/86) to JARE-35 (1993/94). Tokyo, National Institute of Polar Research, 1-60.
- Takahashi, K., Tanimura, A. and Fukuchi, M. (1998): Long-term observation of zooplankton biomass in the Indian Ocean sector of the Southern Ocean. *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **52**, 209-219.
- Voronina, N.M. (1967): Distribution of zooplankton biomass in the Southern Ocean. *Oceanology*, **6**, 836-846.
- Watanabe, K., Nakajima, Y., Ino, Y., Sasaki H. and Fukuchi, M. (1984): Plankton sampling on board Fuji in 1980-1983. *JARE Data Rep.*, **90** (Mar. Biol. 5), 11 p.

(2001年5月9日受付; 2001年9月21日改訂稿受理)